電子デバイス用はんだ熱疲労試験装置の開発[†]

旭 吉 雅 健^{*} 伊 藤 隆 基^{**} 坂 根 政 男^{***}

Development of Thermal Mechanical Fatigue Testing Machine for Solders

by

Noritake HIYOSHI^{*}, Takamoto ITOH^{**} and Masao SAKANE^{***}

This paper describes development of a thermal mechanical fatigue testing machine for solders. Several researches studying on creep, low cycle fatigue and creep-fatigue for solders at constant temperature have been reported recently, but no or small number of studies on thermal mechanical fatigue of solders have been reported. It might be resulted from that suitable thermal mechanical fatigue testing machines, which can perform the test at temperatures applicable to solders, have not been developed. In this study, the thermal mechanical fatigue testing machine which can cover the test temperatures between 233K (−40°C) and 423K (150°C) is developed. Using the developed testing machine, thermal mechanical fatigue test for Sn-3.5Ag lead-free solder was carried out and an applicability of the testing machine is investigated. This study also discusses the obtained thermal mechanical fatigue life in comparing with data in low cycle fatigue test at constant temperature.

Key words : Solders, Thermal mechanical fatigue, Thermal mechanical fatigue testing machine, Thermal mechanical fatigue life, Subzero temperature

1 緒 言

携帯型音楽プレイヤーや、日常生活に欠かすことのできない携帯電話に見られるように、情報機器端末の小型化や軽量化、高機能化は著しい。機器の小型化・高機能化に伴い、電子デバイスはんだ接合部の信頼性確保が重要な課題となっている。すなわち、はんだ接合部の損傷に起因する電気信号不良により電子機器が正常に機能しなくなり、それが原因で重大な事故につながることもある。したがって、電子デバイスの信頼性や製品の健全性保障のためには、電子デバイスの接合部に用いられているはんだの機械的性質の把握や疲労寿命等のデータを蓄積することが不可欠である。

近年、はんだの低サイクル疲労やクリープ、クリープ疲労などに関する研究報告^{1)~8)}が多く見られるようになってきているが、それらのほとんどは一定温度下のものである。しかし、実装基板を構成する主要な部品であるガラスエポキシ基板、チップおよびはんだとでは熱膨張係数が異なることから、電子デバイスの電源のオン・オフの繰返しに伴い、熱膨張係数の異なる被接合部では温度変動に伴う熱疲労損傷が生じる。⁹⁾したがって、はんだの熱疲労強度特性の把握および強度評価法の開発は、電子デバイスの信頼性や製品の健全性保障のための重要な課題である。これまで、はんだの一定温度下での低サイクル疲労の研究は一定数の報告がなされているが、熱疲労特性や熱疲労寿命に関する試験報告^{10)~13)}はきわめて少ない。その要因のひとつに、はんだの使用環境である零

下温度から百数十度にいたる熱疲労試験装置^{14), 15)}が開発されていないことが挙げられる。

本研究では、電子デバイス用はんだの熱疲労に関する実験的研究を行った。上述したように、これまで電子デバイス用はんだの実使用環境に近い温度領域での熱疲労試験装置がなかったことから、233K (−40°C)~423K (150°C)の温度範囲の熱疲労試験装置を開発した。また、開発した試験装置を用いてSn-3.5Agはんだの熱疲労試験を実施し、一定温度下での低サイクル疲労試験結果と比較検討した。

2 はんだ用熱疲労試験装置の開発

2・1 熱疲労試験装置

電子デバイス用はんだの耐久強度に関する試験方法について、はんだ単体での試験法や実装状態での試験法など、いくつかの学協会によって複数の規格^{16)~20)}が定められている。とくに、試験対象物の温度を変化させる熱サイクル試験については、その下限温度および上限温度についてさまざまな数値が試験法標準として提案されている。そのような状況のなかで、熱サイクルの温度範囲に関しては、実装状態を考慮して、また慣例的にも233K (−40°C)~398K (125°C)の条件が用いられることが多い。そこで、本研究では、はんだ用熱疲労試験装置を開発するにあたり、試験装置に必要とされる仕様について以下のように定めた。すなわち、

- 熱サイクルの下限および上限の温度は、それぞれ233K (−40°C) および423K (150°C) とする。

[†] 原稿受理 平成20年6月10日 Received June 10, 2008 ©2009 The Society of Materials Science, Japan

^{*} 正 会 員 石川工業高等専門学校機械工学科 〒929-0392 石川県河北郡津幡町, Dept. of Mech. Eng., Ishikawa National College of Tech., Kahoku-gun, Tsubata-machi, Ishikawa, 929-0392

^{**} 正 会 員 福井大学大学院工学研究科 〒910-8507 福井市文京, Graduate School of Eng., Univ. of Fukui, Bunkyo, Fukui, 910-8507

^{***} 正 会 員 立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東, Dept. of Mech. Eng., Ritsumeikan Univ., Noji-higashi, Kusatsu, 525-8577

- 昇温，降温速度は，最大で1K/sとする。
- 対象材料が軟金属であることから，低荷重域での安定した試験を行うための負荷装置を使用する。
- 低荷重および低変位の試験に対応した荷重および変位測定装置の導入と適切な測定精度を確保する。
- 試験片の変位や荷重などの任意の信号によるクローズドループのフィードバック制御機能を有する。

である。

開発したはんだ用熱疲労試験装置の仕様を Table 1 に，システム概要を Fig. 1 に，また外観写真を Fig. 2 にそれぞれ示す。荷重負荷装置には島津製サーボパルサー E50kN 型を用いた。この荷重負荷装置に，空気コンプレッサーおよび2元冷凍式冷風発生装置を取付け，同装置から冷風を吹出して試験片を冷却した。冷却を効率的に行うために，試験片は荷重負荷装置中央部に設けたステンレス製の試験槽内で冷却されるようにした。冷風発生装置から送出される冷風の風量は一定であり，冷却速度の調整は，冷風発生装置と試験槽との間に設けた電磁バルブの開閉時間の調整によって行った。空気コンプレッサーおよび冷風発生装置のみで試験片を 253K (−20℃) まで冷却することが可能である。さらに，冷風発生装置と電磁バルブとの間には，液体窒素を混合することのできるポートもあり，液体窒素を併用した試験片冷却もできる。すなわち，冷風中に液体窒素を滴下することによって，試験温度の下限を 233K (−40℃) に設定することも可能である。

Table 1 Specifications of thermal mechanical fatigue testing machine.

Testing temperature range	253K~423K 233K~423K (with LN ₂)
Load capacity	±10 kN
Actuator stroke	±50 mm
Hydraulic pressure volume	10 L/min
Heating/Cooling maximum rate	1 K/s
Air compressor capacity	1000 L/min
Induction heater capacity	5 kW

Fig. 1 Schematic showing of control system for thermal mechanical fatigue testing machine.

Fig. 2 General view of thermal mechanical fatigue testing machine.

試験片の加熱および試験片の温度調整は，5kW の高周波誘導加熱装置を用いて行った。Fig. 3 に示すように試験槽内では二巻きの加熱用銅コイルの上下間に冷風吹付口を設置している。なお，Fig. 3 では吹付口の右側の片方のみを図示している。

試験片の温度は，試験片に取付けた K タイプの熱電対で計測し，温度調節器を介して冷風調整用電磁バルブと高周波誘導加熱装置にフィードバックして制御した。この温度制御装置を用いることにより，昇降温速度 1K/s で安定した試験片温度制御を可能とした。

2・2 性能確認試験結果

開発した熱疲労試験装置の性能を確認するため，非鉛系はんだである Sn-3.5Ag を供試材として，熱サイクル 253K (−20℃)～423K (150℃)，昇降温速度 1K/s，機械的ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{mech}}$ が 1.5% の In-phase 型（高温・引張一低温・圧縮）の熱疲労試験を行った。ここで，機械的ひずみとは，伸び計で計測される全ひずみから試験片の加熱・冷却に伴う熱ひずみを差引いたものである。試験片は外径 10mm，平行部長さ 15mm を有する中実試験片であり，その形状・寸法を Fig. 4 に示す。伸びの計測には，差動変位センサー式の伸び計を用いて，10mm の標点間の変位を計測した。なお，はんだは軟金属であることから，伸び計の先端を直接試験片に接触させると押し当て力によって変形したり，押し当て箇所からき裂が発生したりする恐れがある。そこで，一定温度下での疲

Fig. 3 Induction heating coil and cold air outlet.

Fig. 4 Shape and dimensions of specimen (mm).

勞試験で推奨されているように、試験片の表面に少量のエポキシ樹脂を塗布して、そこに窪みを設け、その窪みに伸び計先端を押し当てる方法を採用した^{17), 20)}

試験結果を Fig. 5 に示すが、図中の太い実線は1サイクル中の試験片温度変化を、破線は伸び計で計測された全ひずみ $\varepsilon_{\text{total}}$ を、細い実線は機械的ひずみ $\varepsilon_{\text{mech}}$ を示している。試験片温度履歴は、大きな乱れもなく比較的安定しており、試験片温度は目標熱サイクルである 253K (−20°C) ~ 423K (150°C) に対して、253.3K (−19.7°C) ~ 422.9K (149.9°C) を維持しており、目標値に対する 2% 以内の誤差である。

伸び計から得られる試験片標点部の全ひずみ $\varepsilon_{\text{total}}$ には機械的ひずみ $\varepsilon_{\text{mech}}$ のみならず、試験片の加熱・冷却に伴う熱ひずみ $\varepsilon_{\text{thermal}}$ も含まれている。したがって、機械的ひずみ制御での試験を行う場合、試験片の温度変化による熱ひずみをリアルタイムで補正する必要がある。本試験装置の制御部には熱ひずみ補正機能が装備されており、予め試験片の熱ひずみを計測しておくことによって、デジタル制御による所定の機械的ひずみ範囲が一定の試験を実施することができる。Fig. 5 に示すように機械的ひずみは、引張側振幅が 0.751%，圧縮側振幅が 0.747% であり、ほぼ設定したひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{mech}} = 1.5\%$ の三角波ひずみ波形が得られることを確認できた。

3 Sn-3.5Ag はんだの熱疲労特性

3.1 実験方法

前章の性能確認試験と同じ非鉛系はんだの代表的な材料である Sn-3.5Ag を供試材として、機械的ひずみ制御の In-phase 型および Out-of-phase 型の熱疲労試験を実施した。加熱・冷却の上下限温度は 253K (−20°C) ~ 353K (80°C)、昇降温速度は 1K/s とした。機械的ひずみ範囲

Fig. 5 Waveforms of temperature, total strain and mechanical strain as a function of time in a cycle.

$\Delta\varepsilon_{\text{mech}} = 0.7\%$ および 1.0% の 2 レベルでの試験を実施した。試験片の形状・寸法は、前章の性能確認試験で用いたものと同じであり、Fig. 4 の通りである。試験片は、はんだ素材料を溶融した鋳塊から所定の形状・寸法に機械加工した。試験片標点部はエメリー紙およびバフで研磨し、試験開始前には組織安定化のために融点（絶対温度）の 87% の温度 430K で 1 時間の熱処理を施した。なお、これらの試験片の形状・寸法や製作方法についてははんだ低サイクル疲労試験法およびクリープ疲労試験法標準^{17), 20)}に準拠している。

熱疲労寿命 N_f の定義は、引張側の応力振幅が、定常状態から 75% に低下した時点のサイクル数とした。

3.2 実験結果

Fig. 6 に、機械的ひずみ範囲 $\Delta\varepsilon_{\text{mech}} = 1.0\%$ での、寿命中期における機械的ひずみと応力とのヒステリシスループを示す。図中の破線は比較のために示した 253K (−20°C)⁷⁾ と 353K (80°C)⁶⁾ の一定温度下での低サイクル疲労試験でのヒステリシスループである。

Fig. 6 (a) は In-phase 型試験結果であるが、熱疲労試

Fig. 6 Stress-strain relationships in thermal mechanical fatigue and low cycle fatigue tests.

験で得られるヒステリシスループは、一定温度下での低サイクル疲労試験で得られるものと大きく形状が異なっている。すなわち、一定温度下での低サイクル疲労試験で得られるヒステリシスループの形状は、応力およびひずみがゼロとなる点を中心としてほぼ点対称の形状である。しかし、熱疲労試験で得られたヒステリシスループの形状は点対称にはなっておらず、引張側の応力値が圧縮側のそれに比べて小さい。高温・引張側の応力は約22MPa程度であるのに対し、低温・圧縮側のそれは約-31MPaであり振幅で1.4倍程度の応力差が見られた。低温・圧縮側で応力が高くなる原因は、低温度でははんだの変形抵抗が大きくなることによると考えられる。このことは、熱疲労試験では応力-ひずみ関係に及ぼす試験片温度の影響が大きいことを示唆している。

一方、引張側の最大応力は最大引張時ではなく、引張負荷途中の機械的ひずみがゼロ付近であった。加熱・冷却速度は1K/sであることから熱サイクルの1周期が200sであり、機械的ひずみ範囲が1.0%の場合には0.01%/sのひずみ速度と計算される。はんだの試験ではこのような低ひずみ速度でのクリープの影響は無視できない。したがって、高温・引張負荷途中で既にクリープによる応力緩和が生じており、徐々に応力が低下したために、最高温度となる最大引張時には最大引張応力を示さなかったと考えられる。また、Fig. 6 (a)の熱疲労試験では、中点温度付近の機械的ひずみがゼロ付近で冷風用電磁バルブを開いたことから、冷風による伸び計の振動に起因する若干の応力の乱れが見られる。

Fig. 6 (b)はOut-of-phase型の結果である。同型試験でのヒステリシスループも一定温度下の低サイクル疲労試験結果とは異なり、ゼロ点を中心とした点対称性を示さない。また、In-phase型でのループを180度回転させた形状の応力-ひずみ関係に近い。このことから、Out-of-phase型の試験でも試験片温度の影響による引張側と圧縮側との応力振幅差が表れ、低温度側での応力振幅が大きくなる。すなわち、Sn-3.5Agの低温・引張側の応力は約31MPaであるのに対し、高温・圧縮側のそれは約-22MPaであり、低温・引張と高温・圧縮との応力振幅差は1.4倍程度である。

以上の結果から、Sn-3.5Agについては、In-phase型とOut-of-phase型の違いにかかわらず、応力振幅値は試験片温度が低温度となる負荷側で大きくなった。

熱疲労寿命と一定温度下での低サイクル疲労寿命^{6), 7)}との比較をFig. 7に示す。熱疲労寿命については機械的ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{mech}}$ を用いて、低サイクル疲労寿命については全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{total}}$ を用いて整理した。これまで、一般に耐熱鋼の熱疲労試験では、In-phase型の寿命はOut-of-phase型の寿命よりも短くなることが報告されている^{21), 22)}さらに、熱疲労寿命と低サイクル疲労寿命とを比較すると、熱疲労試験のIn-phase型の寿命は上限温度での低サイクル疲労寿命と同程度であり、Out-of-phase型の寿命は平均温度での低サイクル疲労寿命と同程度であることが知られている^{21), 22)}

Fig. 7 Correlation of fatigue lives with total and mechanical strain ranges.

Fig. 7のSn-3.5Agの機械的ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{mech}} = 0.7\%$ および1.0%では、熱疲労寿命はIn-phase型の方がOut-of-phase型に比べて長寿命となる傾向が見られ、上述の耐熱鋼の傾向とは異なる結果となった。これは、Fig. 6に見られたように、In-phase型では圧縮側の平均応力が、Out-of-phase型では引張側の平均応力が生じており、その平均応力が寿命に影響を及ぼしたものと考えられる。

Sn-3.5Agの $\Delta\epsilon_{\text{mech}} = 0.7\%$ および1.0%では、In-phase型の熱疲労寿命は、上限温度一定での低サイクル疲労寿命と同程度であり、一方Out-of-phase型の熱疲労寿命は下限温度一定での低サイクル疲労寿命と同程度であった。すなわち、In-phase型の $\Delta\epsilon_{\text{mech}} = 0.7\%$ では353Kでの低サイクル疲労寿命は6650サイクルであるのに対し、熱疲労寿命は6500サイクルであった。また、Out-of-phase型の $\Delta\epsilon_{\text{mech}} = 0.7\%$ では、253Kの低サイクル疲労寿命は2350サイクルであるのに対し、熱疲労寿命は3700サイクルであった。

以上のことから、Sn-3.5Agの熱疲労寿命は、熱サイクルの上限温度一定での低サイクル疲労寿命と、下限温度一定での低サイクル疲労寿命との範囲内に整理される。さらに、今回試験を行った熱疲労試験および低サイクル疲労試験のすべての寿命データのばらつきは小さかったことから、低サイクル疲労寿命データを用いた熱疲労寿命の推定を試みた。253Kでの低サイクル疲労試験結果⁷⁾から、全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{total}}$ と低サイクル疲労寿命 N_f との間に次の関係が成り立つ。

$$\Delta\epsilon_{\text{total}} = 629 \times N_f^{-0.85} \quad (1)$$

熱疲労寿命推定時には、式(1)中の全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{total}}$ を熱疲労試験での機械的ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{\text{mech}}$ に置き換えて算出した。

式(1)を用いて熱疲労寿命を推定した結果をFig. 8に示す。Sn-3.5Agの熱サイクルの下限温度一定での低サイクル疲労寿命から、In-phase型の寿命を若干安全側に評価する傾向はあるものの、In-phase型およびOut-of-phase型の熱疲労寿命をほぼ係数2の範囲内で予測することが可能であった。

Fig. 8 Thermal mechanical fatigue life prediction results.

4 結 言

(1) 汎用の電気油圧サーボ疲労試験装置に2元冷凍式冷風発生装置および高周波誘導加熱装置を取付ける機構を用いて253K (−20℃)～423K (150℃)のはんだ用熱疲労試験装置を開発した。

(2) 熱疲労試験での応力-機械的ひずみ関係線図は、一定温度下での低サイクル疲労試験でのそれと大きく異なり、In-phase型では高温・引張時よりも低温・圧縮時のほうが約1.4倍の高い応力振幅を示した。一方、Out-of-phase型では低温・引張時が高温・圧縮時よりも約1.4倍高い応力振幅を示した。In-phase型、Out-of-phase型ともに試験片温度が低温となる側が高い応力振幅を示しており、熱疲労試験での応力-機械的ひずみ関係に及ぼす試験片温度の影響が大きいことがわかった。

(3) Sn-3.5Agの熱疲労寿命は、In-phase型がOut-of-phase型よりも長寿命となる傾向が見られた。In-phase型熱疲労寿命は、熱サイクルの上限温度一定での低サイクル疲労寿命と同程度であった。また、Out-of-phase型熱疲労寿命は、熱サイクルの下限温度一定での低サイクル疲労寿命と同程度であった。

(4) Sn-3.5Agの熱疲労寿命は、熱サイクルの下限温度一定での低サイクル疲労寿命データを用いて簡便に評価することが可能であった。すなわち、熱サイクルの下限温度での低サイクル疲労寿命データを用いると、熱疲労寿命を係数2の範囲内で推定することが可能であった。この熱疲労寿命推定法は、これまでに耐熱鋼等で報告されている「In-phase型では上限温度、Out-of-phase型では上下限の中間温度での低サイクル疲労寿命から熱疲労寿命を推定できる」とは、異なる結果となった。

本研究の一部は、(財)電子回路基板技術振興財団の助成を受けて実施したものである。

参 考 文 献

- 1) S. Yoshioka, S. Tani, M. Kumasawa and A. Inoue, "Low Cycle Fatigue Properties of Solder Material (36Pb62Sn2Ag) at Low Temperatures", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.39, No.442, pp.908-913 (1990).
- 2) T. Yamamoto, M. Sakane, M. Ohnami and T. Yamada, "Multiaxial Low Cycle Fatigue of 63Sn-37Pb Solder", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.44, No.503, pp.1080-1085 (1995).
- 3) T. Yamamoto, M. Sakane, M. Ohnami, Y. Tsukada and H. Nishimura, "Multiaxial Creep-Fatigue of 63Sn-37Pb Solder at Elevated Temperature", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.46, No.8, pp.969-975 (1997).
- 4) T. Yamamoto, M. Sakane, M. Ohnami, M. Yamashita and K. Shiokawa, "Multiaxial Low Cycle Fatigue of Five Kinds of Solders", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.46, No.12, pp.1381-1388 (1997).
- 5) H. Yamada, K. Saruki and K. Ogawa, "Influence of Test Temperature, Strain Frequency and Strain Hold on Fatigue Life of Eutectic Solder 63 Sn-37 Pb", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.66, No.647, pp.1350-1354 (2000).
- 6) The Society of Materials Science, Japan, "Factual Database on Tensile and Low Cycle Fatigue Properties of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag Solders" (2001) The Society of Materials Science, Japan.
- 7) A. Katoh, N. Hiyoshi, M. Sakane, Y. Tsukada and H. Nishimura, "Low Cycle Fatigue of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag Solders at Low Temperatures", JSME Annual Meeting, Vol.2002, No.2, pp.437-438 (2002).
- 8) The Society of Materials Science, Japan, "Factual Database on Creep and Creep-Fatigue Properties of Sn-37Pb and Sn-3.5Ag Solders" (2004) The Society of Materials Science, Japan.
- 9) T. Tsukada, H. Nishimura, M. Sakane and M. Ohnami, "Fatigue Life Analysis of Solder Joints in Flip Chip Bonding", Trans. ASME, Journal of Electronic Packaging, Vol.122, No.3, pp.207-213 (2000).
- 10) M. Miyazaki, S. Yoshioka and A. Hijikata, "Evaluation of Thermal Fatigue Strength in Lap Type Solder Joints", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.30, No.331, pp.330-335 (1981).
- 11) S. Ogashiwa, Y. Murakami and A. Inoue, "Thermal Fatigue of Pb-Sn-Sb-Cu Solders", Journal of the Japan Institute of Metals, Vol.58, No.8, pp.952-958 (1994).
- 12) Y. Uegai, S. Tani, A. Inoue, S. Yoshioka, S. Badono and A. Hijikata, "Evaluation Method of Thermal Fatigue Life for Surface-Mount Solder Joints by Mechanical Fatigue Test", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.61, No.584, pp.729-735 (1995).
- 13) M. Mukai, T. Kawakami, K. Takahashi, K. Kishimoto and T. Shibuya, "Effects of Hold-Time on Thermal Fatigue Life

- of Solder Joints”, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.63, No.611, pp.1594-1600 (1997).
- 14) The First Division of the Committee on High Temperature Strength JSMS, “The Current Situation of Thermal Fatigue Testing and Low-Cycle Fatigue Testing at Elevated Temperature in Japan”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.20, No.210, pp.439-443 (1971).
- 15) The Committee on High Temperature Strength JSMS, “Standardization of Thermal Mechanical Fatigue Tests”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.23, No.246, pp.219-223 (1974).
- 16) The Society of Materials Science, Japan, “Standard Tensile Testing for Solders” (2000) The Society of Materials Science, Japan.
- 17) The Society of Materials Science, Japan, “Standard Low Cycle Fatigue Testing for Solders” (2000) The Society of Materials Science, Japan.
- 18) Japan Electronics and Information Technology Industries Association, “Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association EIAJ ED-4701/100 Environmental and endurance test methods for semiconductor devices (Life test I)” (2001) Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
- 19) Japan Electronics and Information Technology Industries Association, “Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association EIAJ ED-4702A Mechanical stress test methods for semiconductor surface mounting devices” (2003) Japan Electronics and Information Technology Industries Association.
- 20) The Society of Materials Science, Japan, “Standard Creep-Fatigue Testing for Solders” (2004) The Society of Materials Science, Japan.
- 21) M. Okazaki, “New Challenges for Thermo-Mechanical Fatigue II : Fundamentals of Thermo-Mechanical Fatigue”, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.2, pp.190-196 (2007).
- 22) S. Taira, M. Fujino and R. Ohtani, “Collaborative Study on Thermal Fatigue Properties of High Temperature Alloys in Japan”, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.1, pp.495-508 (1979).